

Estudio del texturizado de superficies lubricadas para la mejora del coeficiente de fricción

E. de la Guerra Ochoa⁽¹⁾, E. Chacón Tanarro, J. Echávarri Otero, P. Lafont Morgado, A. Díaz Lantada, Juan Manuel Muñoz-Guijosa, José Luis Muñoz Sanz; V. Rodríguez de la Cruz, D. Fernández Caballero

(1) Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación. División de Ingeniería de Máquinas GI-IM.
Universidad Politécnica de Madrid
e.delaguerra@upm.es

El texturizado de superficies se ha mostrado como una herramienta muy útil para la ampliación de los regímenes hidrodinámicos y elastohidrodinámicos y por lo tanto para la reducción del coeficiente de fricción en condiciones de alta carga y baja velocidad.

Por esta razón, se ha realizado el texturizado de diferentes testigos de cobre mediante fotolitografía y ataque químico para la medida del coeficiente de fricción en una máquina de contacto puntual en diferentes regímenes de lubricación.

Los resultados demuestran la mejora del coeficiente de fricción y una ampliación del régimen EHL.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente diferentes sectores (como el automovilístico, fabricación, etc. [1-6]) están invirtiendo sus esfuerzos en investigaciones sobre cómo reducir la fricción y el desgaste en sistemas mecánicos. Para lograr estos objetivos se plantean, entre otras, las siguientes líneas de actuación: desarrollo de lubricantes de menor viscosidad y mayor duración, desarrollo de materiales de baja fricción y recubrimientos duros, desarrollo de superficies óptimas de ingeniería mediante el empleo de micro-topografías o texturas superficiales [7].

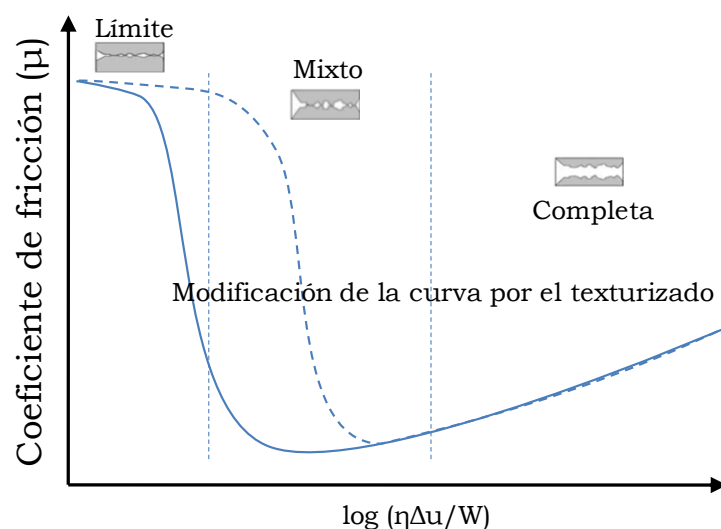


Figura 1. Variación de los regímenes de lubricación, representados sobre la curva de Stribeck, por efectos del texturizado

En este último punto es donde se centra el objetivo del trabajo. Mediante el texturizado de superficies que están en contacto lubricado se consiguen modificar las condiciones de lubricación existentes, es decir, el cambio del régimen de lubricación con el fin de reducir el desgaste y la fricción [8]. Como se muestra en la figura 1, un texturizado puede permitir la modificación del régimen de lubricación y la reducción del coeficiente de fricción.

Existen diferentes estudios sobre la aplicación de texturizados y microtexturizados a superficies para lograr una variación de sus propiedades tribológicas. En las referencias [9-11] se presentan las primeras experiencias realizadas por Hamilton y Anno sobre superficies texturizadas para mejorar las condiciones de lubricación en cojinetes hidrodinámicos.

En los estudios previos se han empleado numerosas técnicas para la realización de texturizado y en la Tabla 1 se recogen algunas de las diferentes experiencias realizadas por otros autores.

Técnica	Material	Forma de la textura	Ref.
Laser (LST)	NiCrBSi recubrimientos	Círculos	[12, 13]
Fotolitografía y oxidación térmica	Obleas de silicio	Cuadrados	[14]
Electrodeposición de níquel	Acero inoxidable	Hexágonos	[15]
Fotolitografía y Electrodeposición de níquel	Acero	Hexágonos	[16]
LST y jet abrasivo	Nitruro de Silicio	Círculos	[17]
Ataque micro-electrolítico	Acero	Círculos Elipse Triángulo	[18]
Micromecanizado y granallado	Fundición	Surcos Círculos	[19]

Tabla 1. Diferentes técnicas de microtexturizado

En todos ellos el objetivo es conseguir la geometría óptima para el diseño de superficies que permitan reducir el coeficiente de fricción de un sistema mecánico lubricado (tribosistema) y ampliar su régimen de lubricación (elasto)hidrodinámica. De este modo, se consigue que éste pueda operar en condiciones más extremas (cargas más altas y/o velocidades más bajas).

Estudios anteriores [18, 20, 21] parecen mostrar que las texturas actúan como reservorios de lubricante que sirven para lubricar el contacto al inicio de la aparición del régimen mixto, además, las modificaciones en la geometría producen un efecto de cuña hidrodinámica, aumentando la presión de contacto local y por tanto, la capacidad de carga del contacto.

En este artículo se presenta la técnica de fotolitografía y ataque químico sobre discos de cobre para mejorar sus propiedades tribológicas en contactos altamente cargados, como el contacto puntual elastohidrodinámico (EHL). El efecto del texturizado en contactos puntuales ha sido menos estudiado que el caso del contacto lineal. Así mismo, se analiza el efecto de los diferentes parámetros de influencia: tamaño, densidad, carga o la rugosidad inicial.

A través de la técnica de fotolitografía se tiene de manera rápida, un conjunto de testigos a modo de prototipos (Rapid Prototyping), para ensayo en un equipo tribológico. De esta manera se puede mejorar el diseño de una superficie de manera complementaria a los procesos de simulación o diseño virtual que modelan el comportamiento de lubricación mixto-EHL para superficies complejas.

2. DISEÑO DE LAS PROBETAS Y DEL PLAN DE ENSAYOS

La máquina de ensayo que se va a utilizar para los ensayos tribológicos es una Mini-Traction Machine (MTM) de PCS Instruments que permite la medida del coeficiente de fricción en una gran cantidad de condiciones, materiales o tipos de contacto. El contacto elegido es contacto puntual entre una bola de acero y un disco de cobre, cuyas propiedades y características principales quedan recogidas en la Tabla 2.

	Material	E(GPa)	ν	r(mm)	R _a (μ m)
Bola	Acero E-52100	210	0.3	9.525	0.01
Disco	Cobre	117	0.34	∞	0.007- 0.1

Tabla 2. Propiedades de los materiales

La MTM permite barrer todo el régimen de funcionamiento desde EHL completa hasta régimen mixto-límite debido a los amplios rangos de carga, temperatura, velocidad y deslizamiento disponibles. Para el estudio de la transición del régimen EHL-Mixto, se han seleccionado las condiciones de funcionamiento que se recogen en la Tabla 3.

u_m (mm/s)	SRR (%)	W(N)	T(°C)
100-3500	5-100	5, 20	40, 80

Tabla 3. Condiciones del ensayo

Gracias a los datos de la carga y las propiedades del material se calculan el radio del contacto hertziano (a) y la presión de Hertz (p_0) [23] con las expresiones recogidas en la Eq. (1).

$$p_0 = \frac{3W}{2\pi a^2} \quad a = \sqrt[3]{\frac{3WR^*}{2E'}} \quad (1)$$

Estos dos parámetros incluyen la influencia de la carga normal aplicada (W), del módulo de Young reducido (E') de los materiales en contacto y el radio reducido (R^*) de la curvatura de las superficies.

A partir de los datos de carga recogidos en la Tabla 3 y las propiedades de la Tabla 2, se obtiene que las presiones de contacto son 670.6MPa y 422.5MPa para 20 y 5N respectivamente.

La geometría seleccionada son círculos debido a su simplicidad y a que no se quiere que la orientación de la textura tenga influencia en los resultados [18]. Los parámetros a definir en la geometría de la textura son, por tanto, el diámetro y la densidad superficial del texturizado.

Para la definición del diámetro se parte de los radios de contacto hertziano (a) seleccionando tres diámetros para el texturizado, uno inferior, otro superior y el último, de un tamaño aproximado a la huella calculada [17]. Estos tres tamaños $\Phi_1=100\mu\text{m}$, $\Phi_2=200\mu\text{m}$, $\Phi_3=400\mu\text{m}$.

El otro parámetro que queda por definir es la densidad (ρ) del área texturizada (A_ϕ). Ésta viene dada por la Eq. (2) y se define como el área atacada (área del círculo) entre el área nominal (A_n), Figura 2. En experiencias previas [12, 26, 25] las densidades elegidas se encuentran entre el 5% y 20%. Se toma una densidad del 10% y otra del 25% para comprobar el efecto del aumento de densidad del texturizado.

$$\rho(\%) = \frac{A_\phi}{A_n} = \frac{\pi\Phi^2}{4l^2} \cdot 100 \quad (2)$$

El lubricante empleado en los ensayos es una PAO6 sin aditivos, cuyas propiedades se encuentran en [26].

3. FABRICACIÓN DE LOS TESTIGOS DE ENSAYO

Para la fabricación de las texturas seleccionadas se emplea la técnica de fotolitografía y ataque químico. Para la fotolitografía se utiliza un equipo SF-100 Intelligent Micro Patterning. El proceso seguido se divide en las siguientes fases: se realiza un CAD con la textura, ésta se introduce en el equipo de fotolitografía que proyecta un haz de luz monocromática sobre una fotorresina que se encuentra adherida a la superficie del material. En este caso se utilizó una fotorresina negativa que se endurece tras la exposición para su posterior revelado. Durante el revelado se elimina la fotorresina no endurecida, dejando en las zonas no expuestas la superficie del material libre para el ataque químico. La probeta se introduce entonces en un baño de FeCl₃ al 40% en peso que ataca el cobre no protegido, dando lugar a la geometría elegida [16]. Controlando el tiempo y la temperatura del ataque se obtienen diferentes profundidades. Finalmente, se realiza el stripping de la probeta para eliminar completamente la fotorresina, se lava y se protege para su posterior ensayo. El proceso queda reflejado en la figura 2.

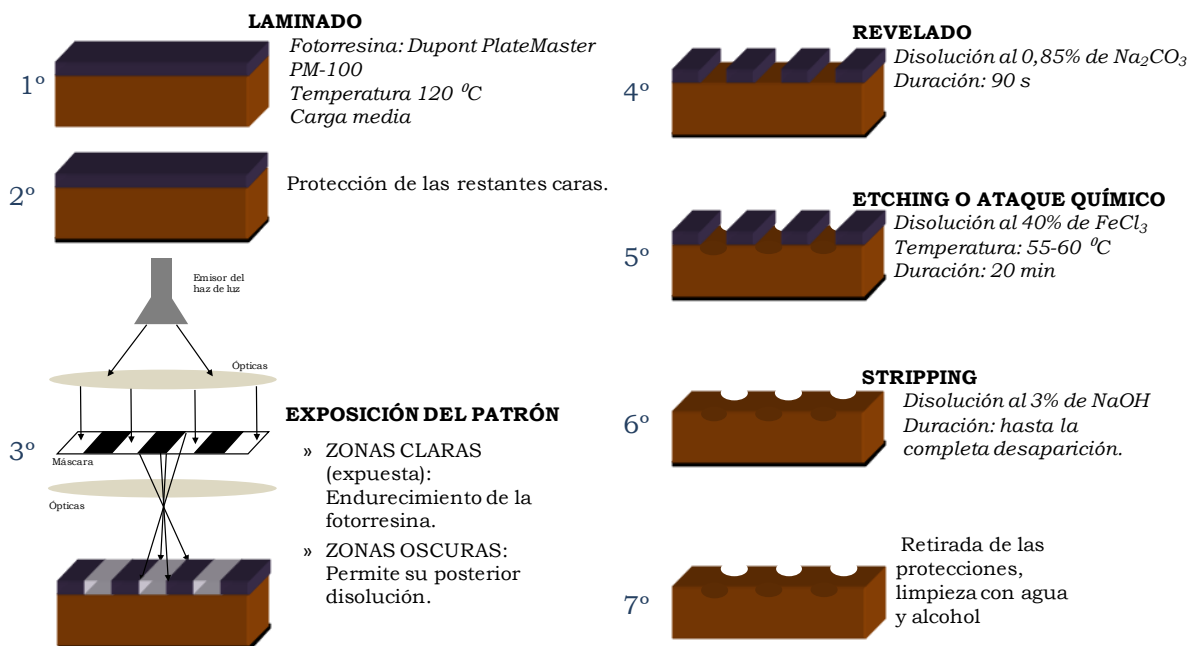


Figura 2. Esquema del proceso de fabricación

Los resultados obtenidos se muestran a continuación en la figura 3.

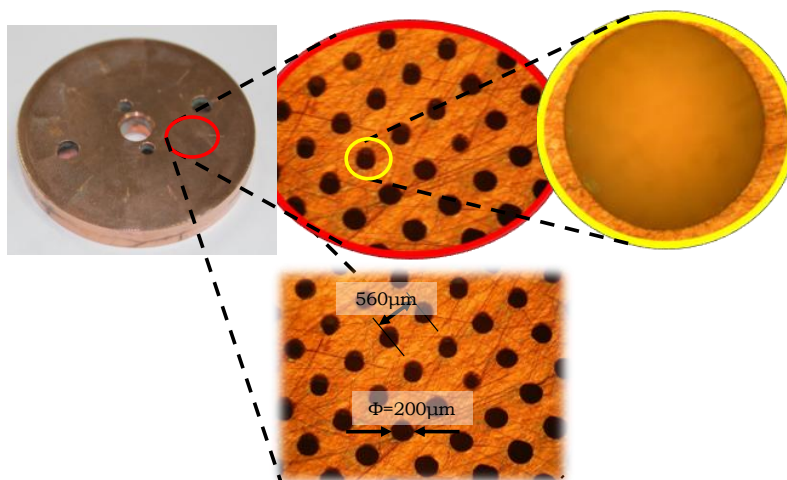


Figura 3. Resultados obtenidos en el texturizado

La profundidad (d), ajustada a partir del tiempo de ataque, se mide con un perfilómetro obteniendo una relación $\Phi/d \approx 4$ como se puede ver en la figura 3 con una forma más suavizada que las obtenidas con técnicas como el Jet Abrasivo o LSP [17].

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez se tenían las probetas listas, se pasó al ensayo de medida del coeficiente de fricción en la MTM según las condiciones presentadas en la Tabla 3. Se obtuvieron más de 1600 registros y se analizó el efecto de diámetro del texturizado, la densidad, la carga y el efecto de la rugosidad inicial sobre el texturizado. Se ensayaron también discos sin texturizar que se utilizarán como patrón de comparación.

5. Parámetros de influencia

En la Figura 4 se pueden ver el efecto del tamaño de las texturas sobre el coeficiente de fricción. Es claro que una disminución del diámetro del texturizado aumenta la zona de funcionamiento con lubricación completa y provoca una disminución significativa del coeficiente de fricción. Para el caso de 20N de la figura 4, se ve que con la mejora del coeficiente de fricción se produce en todo el rango de funcionamiento por debajo de los 2500mm/s donde el régimen EHL está desarrollado por completo en el caso de la probeta lisa. En el caso de 5N tenemos mejora para velocidades menores 2750mm/s, siendo muy notable la reducción conseguida en el régimen mixto para las texturas de $R=100$ y $50\mu\text{m}$.

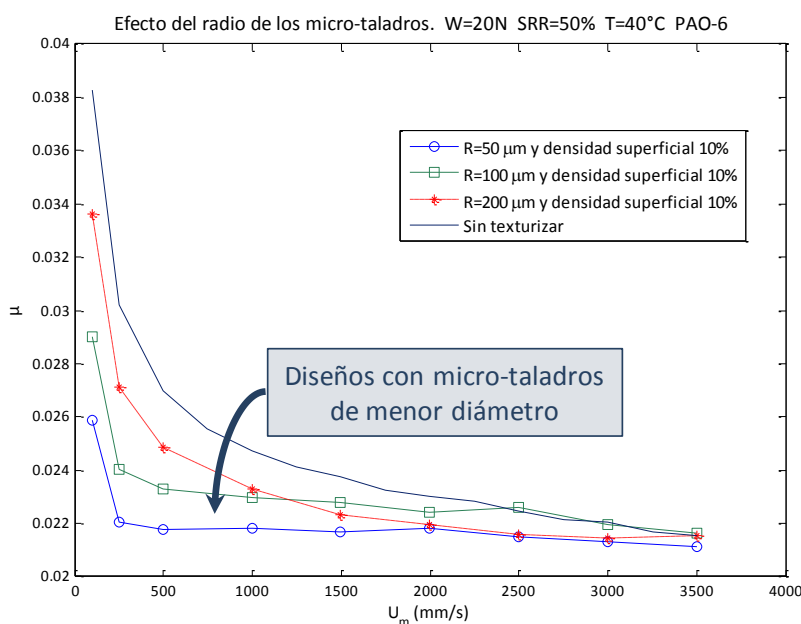


Figura 4. Efecto del tamaño de la textura sobre el coeficiente de fricción. Coeficiente de fricción para discos texturizados y liso con rugosidad $R_a=0.007\mu\text{m}$ con PAO6 40°C, $W=5$ y 20N y $SRR=75$ y 50%.

En general el texturizado más pequeño es el que obtiene los mejores resultados. De los texturizados realizados, todos mejoran los resultados obtenidos al disco sin texturizar. Como resumen de las reducciones medias en el régimen mixto para cada uno de los texturizados en función del deslizamiento para la densidad del 10% se tiene que el texturizado de $R=50\mu\text{m}$ obtiene unas reducciones medias cercanas al 30% respecto a la probeta sin modificación superficial.

El efecto de la densidad de área texturizada se presenta en la figura 5 donde se representa el aumento de la densidad de superficie atacada del 10% al 25% para dos patrones, el de $R=100\mu\text{m}$ y $R=200\mu\text{m}$ junto con la probeta sin texturizado. En todos los casos, se muestra

que el patrón con $\rho=25\%$ empeora ligeramente o iguala el comportamiento de coeficiente de fricción del patrón del 10% en todo el rango de funcionamiento ensayado.

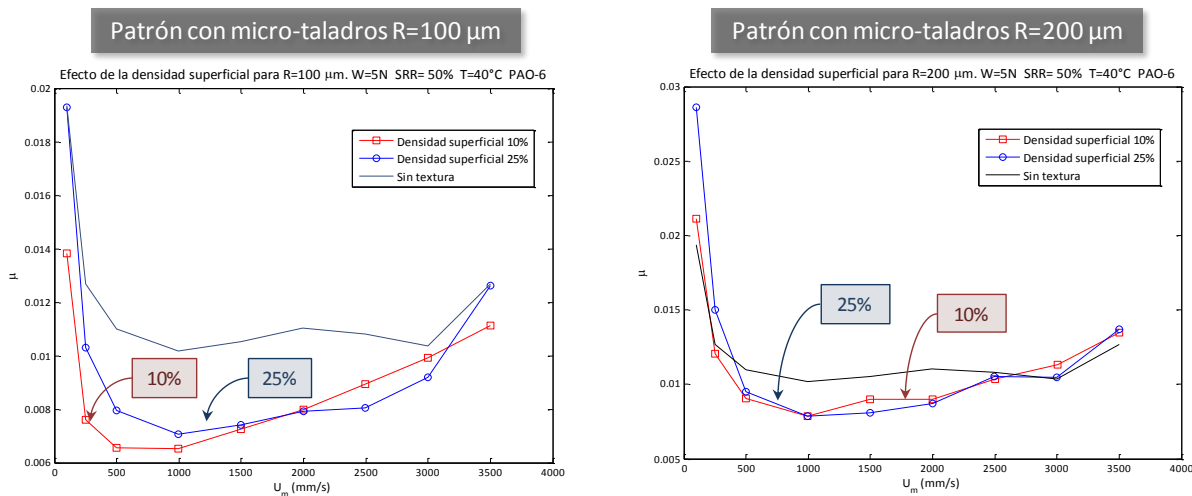


Figura 5. Efecto de la densidad superficial sobre el coeficiente de fricción. Coeficiente de fricción para densidades de 25% y 10%. $R=100$ y $200\mu\text{m}$ $R_a=0.007\mu\text{m}$ con PAO6 40°C , $W=20\text{N}$ y $\text{SRR}=50\%$.

Otro efecto observado es el diferente comportamiento de la densidad con los diferentes radios de las texturas. Los datos obtenidos parecen indicar que la densidad superficial juega un papel secundario tras el tamaño de los micro-taladros, ya que una mala elección del tamaño (R) hace que el efecto de la densidad sea despreciable.

6. CONCLUSIONES

La fotolitografía y el ataque químico se han mostrado como una buena herramienta para la realización del microtexturizado, siendo la principal limitación la geometría de la superficie a texturizar. Para obtener una buena resolución en la geometría se requiere que el haz de luz sobre la fotorresina esté enfocado sobre una superficie plana completamente alineada, por lo que superficies con curvaturas complejas harían más complicada la realización del texturizado con esta técnica. Como ventajas, es una técnica que de manera rápida y sencilla permite la obtención de testigos para ensayo y por tanto, es muy útil para la etapa de diseño y prototipado de la superficie final.

Sobre los resultados obtenidos y a la vista de los ensayos realizados, se ha visto que el texturizado tiene una influencia positiva en el coeficiente de fricción para las condiciones de régimen mixto de lubricación. Se han analizado los parámetros de influencia de la textura empleada, siendo el diámetro de la textura el parámetro crítico.

También se han analizado a través de imágenes tomadas después de los ensayos los posibles mecanismos de actuación de las texturas en la reducción de la fricción: modificación geométrica del contacto, reservorios, retención de partículas, etc.

7. REFERENCIAS

- [1] A.W. Lang, P. Motta, P. Hidalgo, M. Westcott. *Bristled shark skin: a microgeometry for boundary layer control?* *Bioinsp. Biomim.*, 3, 046005, (2008), DOI: 10.1088/1748-3182/3/4/046005.
- [2] P.C. Salaberry. *Vehicle with drag-reducing outer surface*. U.S. Patent 7810867 B2, (2010).
- [3] N. Tagawa, D.B. Bogy. *Air film dynamics for micro-textured flying head slider bearings in magnetic hard disk drives*. *Journal of Tribology*. 2002, vol. 124, nº3, pp. 568-574
- [4] Z. Krzyzak, P. Pawlus, *'Zero-wear' of piston skirt surface topography*. *Wear*, Volume 260, Issues 4–5, 24 February 2006, Pages 554-561

- [5] S. Świrad. *The surface texture analysis after sliding burnishing with cylindrical elements*. Wear, Volume 271, Issues 3–4, 3 June 2011, Pages 576-58
- [6] Z. Ye, C. Zhang, Y. Wang, H.S. Cheng, S. Tung, Q. Jane Wang, X. He. *An experimental investigation of piston skirt scuffing: a piston scuffing apparatus, experiments, and scuffing mechanism analyses*. Wear, Volume 257, Issues 1–2, July 2004, Pages 8-31.
- [7] COST Action 532. *Scientific final report: Triboscience and Tribotechnology*. Superior friction and wear control in engines and transmissions. (2007).
- [8] A. Kovalchenko., O. Ajayi, A. Erdemir , G. Fenske, I. Etsion. *The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact*. Tribology International, 38 pp. 219–225, (2005).
- [9] D.B. Hamilton, J.A. Walowit , C.M. Allen. *A Theory of Lubrication by Microirregularities*, Journal of Basic Engineering, Transaction of ASME, pp. 177-185, (1966).
- [10] J.N. Anno, J.A. Walowit, C.M. Allen. *Load Support and Leakage from Microasperity-Lubricated Face Seals*. Journal of Basic Engineering, Transaction of ASME, pp. 726-731, (1969).
- [11] J.N. Anno, J.A. Walowit, C.M. Allen. *Microasperity Lubrication*, ASME J. Lubr. Technol., 90(2), pp. 351–355 (1968)
- [12] A. Higuera, R. González, M. Cadenas, A. Hernández. *Tribological behaviour of laser-textured NiCrBSi coatings*. Wear, 271, pp. 925-933, (2011).
- [13] I. Etsion. *State of the Art in Laser Surface Texturing*. Journal of Tribology, 127, pp. 248-253, (2005), DOI: 10.1115/1.1828070.
- [14] U. Petterson, S. Jacobson. *Influence of surface texture on boundary lubricated sliding contacts*. Tribology International 36, pp. 857-864, (2003).
- [15] L.S. Stephens, R. Siripuram, M. Hayden, B. McCartt. *Deterministic Micro Asperities on Bearings and Seals using a modified LIGA process*. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 126, pp. 147-154, (2004).
- [16] S.N. Kortikar, L.S. Stephens, P.C. Hadinata, R. Siripuram. *Manufacturing of microasperities on thrust surfaces using ultraviolet photolithography*. American Society for Precision Engineering Winter Topical Meeting 28, pp. 148-153, (2003)
- [17] Wakuda M., Yamauchi Y., Kanzaki S., Yasuda Y. *Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact*. Wear 254, pp. 356-363, (2003).
- [18] Yu H., Wang X., Zhou F. *Geometric shape effects of surface texture on the generation of hydrodynamic pressure between conformal contacting surfaces*. Tribol. Lett., 37, pp. 123-130. (2010) DOI: 10.1007/s11249-009-9497-4.
- [19] Nakano M. et al. *Applying Micro-Texture to Cast Iron Surfaces to Reduce the Friction Coefficient under Lubricated Conditions*. Tribol. Lett., 28, pp.131-137, (2007), DOI: 10.1007/s11249-007-9257-2.
- [20] Q. Jane Wang and Dong Zhu. *Virtual Texturing: Modeling the Performance of Lubricated Contacts of Engineered Surfaces*, J. Tribol. 127, 722 (2005), DOI:10.1115/1.2000273
- [21] Křupka, M. Hartl, *The effect of surface texturing on thin EHD lubrication films*, Tribology International, Volume 40, Issue 7, July 2007, Pages 1100-1110.
- [22] W.S. McCulloch, W.H. Pitts *A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity*, Bulletin of mathematical biology, Vol. 5 pp. 115-133 1943. Springer,
- [23] Hertz H. *On the contact of elastic solids*. Journal für die reine und angewandte Mathematik 1882; 156-171.
- [24] Galda L., Dzierwa A., Pawlus P., Reizer R. *Improvement of tribological properties of contacting elements by oil pockets creation on sliding surfaces*. Meccanica (2011), 46 (3), pp. 523-534.
- [25] Vilhena L., Podgornik B. Vižintin, J., Možina, J. *Influence of texturing parameters and contact conditions on tribological behaviour of laser textured surfaces*. Meccanica (2011) 46 (3), pp. 567-575.

- [26] Echávarri J., Lafont P., Chacón E., de la Guerra E., Díaz A., Muñoz-Guijosa J.M., Muñoz J. L. *Analytical model for predicting the friction coefficient in point contacts with thermal elastohydrodynamic lubrication*. Proc. IMechE Vol. 225 Part J: J. Engineering Tribology, pp. 181-191, (2011).